

УДК 531.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИССИПАТИВНЫХ ФАКТОРОВ ПРИ ПРОБИВАНИИ МНОГОСЛОЙНЫХ ТКАНЫХ ПРЕГРАД*

© 2015 г.

Моссаковский П.А.¹, Баландин В.В.²,
Беляев А.П.¹, Белякова Т.А.^{1,3}, Брагов А.М.²,
Инюхин А.В.¹, Костырева Л.А.¹

¹НИИ механики Московского государственного университета
им. М.В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация

²Научно-исследовательский институт механики
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского,
Нижний Новгород, Российская Федерация

³Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Москва, Российская Федерация

moss@imec.msu.ru

Поступила в редакцию 13.10.2015

Проведено экспериментально-вычислительное исследование по оценке диссипативных факторов в процессах пробивания преград из тканых композитов на основе арамидных волокон. Рассмотрены разнообразные типы 2D-плетения слоев (13 типов), а также некоторые характерные виды поперечной прошивки, являющиеся вариантами 3D-плетения. Установлено, что ведущим диссипативным фактором при пробивании тканых преград относительно малой толщины (до 10 слоев) является работа на перемещениях волокон, а не традиционно принимаемые потери на трение и разрушение. В подтверждение этого результата показано, что поперечная прошивка многослойного тканого композита, используемая для увеличения его изгибной жесткости, но при этом ограничивающая перемещения волокон, не способствуют улучшению защитных свойств преграды.

Ключевые слова: пробивание, разрушение, многослойные преграды, диссипация энергии, арамидные волокна, тканые композиты, тип плетения, поперечная прошивка.

Многослойные защитные оболочки, представляющие собой пакеты тканых слоев на основе арамидных нитей, широко используются при создании облегченных корпусных элементов космической и авиационной техники, а также средств индивидуальной защиты. Выбор материалов слоев таких преград, их толщин и взаимного расположения в зависимости от конструктивных особенностей и характера динамической нагрузки является нетривиальной оптимизационной задачей, решение которой невозможно без привлечения компьютерного моделирования. Надежность результатов, полученных с применением этого подхода, в основном определяется качеством использованной математической модели пробивания. В более ранних

* Выполнено при поддержке РФФИ (гранты 13-08-00706, 13-01-00401 и 15-38-20759) и РНФ (грант 15-19-10032) в части экспериментальных исследований.

работах [1, 2] рассмотрены вопросы построения адекватных разномасштабных математических моделей пробивания многослойных тканых преград, а также экспериментальные и численные методы их верификации. В частности, показано, что построенная полномасштабная модель (с детализированной геометрией с точностью до волокна) обладает высокой предсказательной способностью, что подтверждается качественным и количественным согласованием результатов расчетов с экспериментом в различных баллистических тестах.

Статья посвящена определению основных диссипативных факторов, определяющих защитные свойства преграды, а также исследованию влияния разнообразных типов плетения ткани на диссипативные характеристики многослойного тканого композита. Несмотря на большое количество публикаций, посвященных задаче пробивания тканых преград, вопрос о главных диссипативных факторах в процессе пробивания остается открытым. Традиционно считалось, что к таковым, в первую очередь, относятся потери на трение (межволоконное и в результате контакта с ударником) [3, 4] и работа, затрачиваемая на локальное разрушение волокон. Приобретенная в процессе пробивания кинетическая энергия волокон считалась второстепенным фактором. С этим представлением, в частности, связано использование «с целью улучшения защитных свойств преграды» невязких связующих, ограничивающих движение волокон. Альтернативный взгляд на механизм диссипации при пробивании тканого композита представлен в [5, 6], в соответствии с которым ведущим диссипативным фактором является работа по вытягиванию отдельных волокон. Исследование механизма диссипации, приведенное в настоящей статье, включало в себя проведение натуральных и виртуальных (с использованием полномасштабной математической модели) баллистических тестов по пробиванию четырехслойных преград с различными типами переплетения волокон (рис. 1) твердым сферическим ударником.

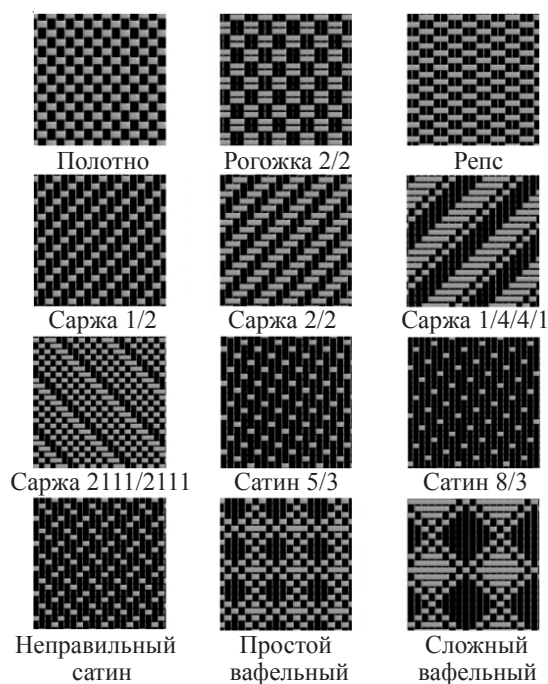


Рис. 1. Типы плетений тканевой преграды

Результаты натуральных баллистических тестов по пробиванию четырехслойных тканевых образцов размером 150×150 мм полотняного и саржевого плетений различных типов представлены в таблице 1. Численное моделирование выполнялось с использованием 13 различных схем плетения: полотняное переплетение и его производные – репс и рогожка; различные по сложности виды саржевого переплетения; сатиновые и вафельные переплетения. Расчеты проводились в рамках полномасштабной модели пробивания, подробно описанной в [2]. Виртуальные образцы имели размеры 50×50 мм в плане. Ударник представлял собой стальной шарик массой 1 г с диаметром 6 мм; его скорость варьировалась от 350 до 450 м/с.

Таблица 1

Результаты натуральных баллистических тестов

| Тип плетения мишени | Скорость удара, м/с | Запреградная скорость, м/с |
|---------------------|---------------------|----------------------------|
| Полотно | 357 | Нет пробития |
| Саржа 2/2 | 357 | 230 |
| Саржа 3/3 | 353 | 285 |
| Саржа 2111/2111 | 350 | Нет пробития |
| Саржа 1/4/4/1 | 353 | 255 |
| Полотно | 407 | 157 |
| Саржа 2/2 | 421 | 352 |
| Саржа 3/3 | 407 | 315 |
| Саржа 2111/2111 | 412 | 270 |
| Саржа 1/4/4/1 | 412 | 309 |
| Полотно | 432 | 339 |
| Саржа 2/2 | 443 | 439 |
| Саржа 3/3 | 449 | 424 |
| Саржа 1/4/4/1 | 449 | 392 |

Сравнение результатов натуральных и виртуальных баллистических тестов позволяет сделать вывод об их хорошем согласовании (рис. 2).

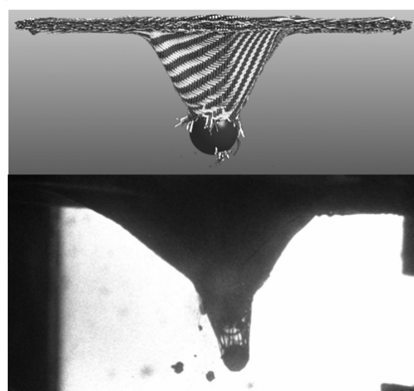


Рис. 2. Сравнение результатов натуральных и виртуальных экспериментов по пробиванию саржи 3/3. Скорость удара 353 м/с

С целью исследования механизма диссипации энергии и определения его главных факторов по результатам виртуальных тестов вычислялись следующие величины: кинетическая энергия волокон K , внутренняя упругая энергия волокон U , дис-

сипация энергии при трении S , диссипация энергии при разрушении волокон F , кинетическая энергия ударника K_{ind} и полная энергия системы E . Диссипация энергии при разрушении F оценивалась по суммарному значению кинетической и упругой энергии элементов, удаленных из расчета при выполнении в них условия разрушения. Кинетическая энергия волокон $K = \sum_{i \in \Lambda_E} K_i$ и внутренняя упругая энергия волокон $U = \sum_{i \in \Lambda_E} U_i$ определялись как соответствующие суммарные величины для множества всех «неразрушенных» конечных элементов волокон Λ_E . Диссипация энергии при трении $S = \sum_{i \in S_C} F_{\tau_i} \Delta u_i$ вычислялась по сумме работ тангенциальных составляющих поверхностных сил на перемещениях узлов, принадлежащих всем поверхностям контакта S_C . На рис. 3–5 показаны изменения различных составляющих полной энергии в системе ударник–тканый пакет в процессе пробивания образцов с разными типами плетения. Все величины отнесены к максимуму изменения кинетической энергии ударника K_{ind} . Для дополнительного контроля корректности расчета проверяется неизменность полной энергии системы $\Delta E = \Delta U + \Delta K + \Delta S + \Delta F + \Delta K_{ind} = 0$.

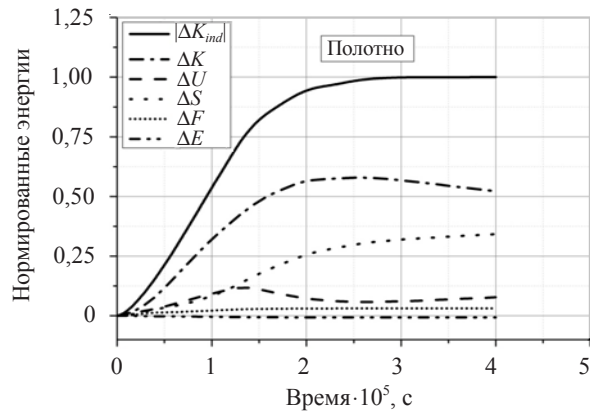


Рис. 3. Нормированные величины энергий при пробивании образца из полотна при начальной скорости ударника 350 м/с

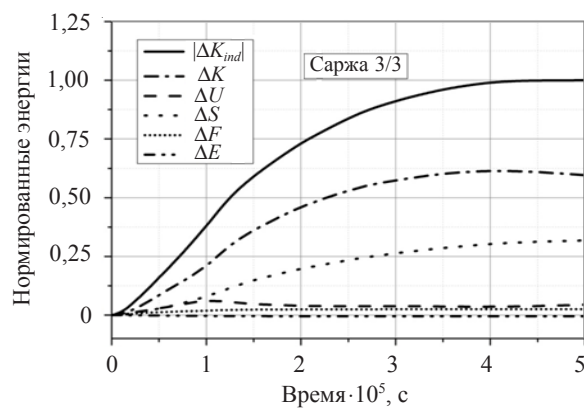


Рис. 4. Нормированные величины энергий при пробивании образца из саржи 3/3 при начальной скорости ударника 350 м/с

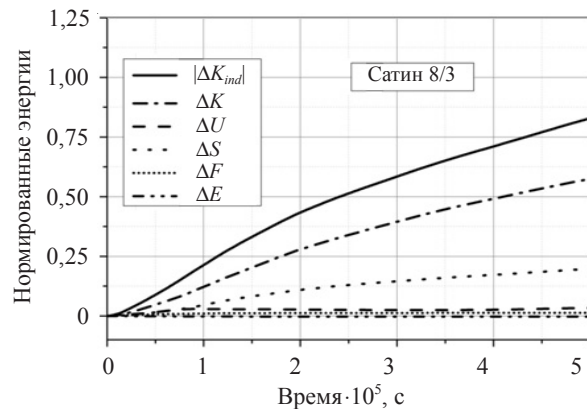


Рис. 5. Нормированные величины энергий при пробивании образца из сатина 8/3 при начальной скорости ударника 350 м/с

В последнее время получили распространение объемные (3D) схемы плетения. Применение таких схем способствует увеличению изгибной жесткости преграды, но несколько ограничивает относительные перемещения волокон. Эффективность использования подобных схем в защитных преградах практически не исследована. Одним из наиболее распространенных вариантов 3D-прошивки является поперечное армирование. Проведено сравнительное экспериментально-вычислительное исследование эффективности десятислойных полотняных тканых преград 50×50 мм в плане с поперечным армированием (трех характерных типов) и без него (см. таблицу 2 и рис. 6–9).

Таблица 2

Начальные и конечные скорости ударника по данным баллистических тестов и численного моделирования при пробивании десятислойных образцов с поперечной прошивкой и без нее

| Образец (полотно), вид эксперимента | Скорость удара, м/с | Запреградная скорость, м/с |
|-------------------------------------|---------------------|----------------------------|
| Без прошивки, натуральный | 346 | 315 |
| Без прошивки, виртуальный | 350 | 314 |
| С прошивкой, натуральный | 350 | 317 |
| С прошивкой, виртуальный | 350 | 315 |

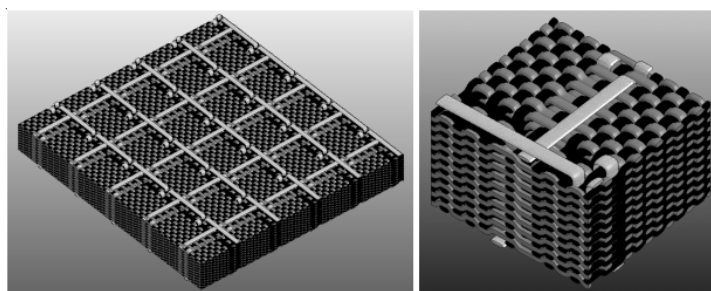


Рис. 6. Моделирование десятислойного тканого пакета с объемной схемой плетения (поперечной прошивкой)

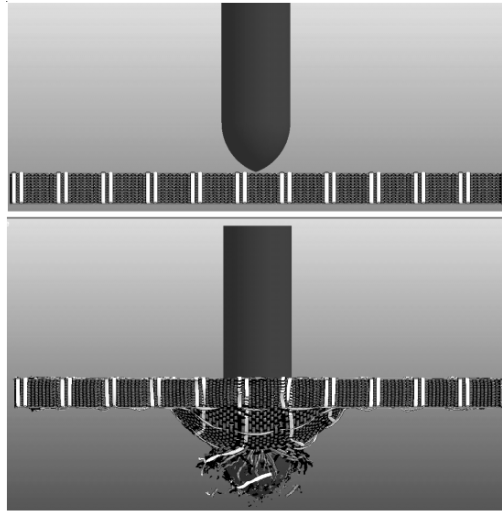


Рис. 7. Моделирование пробивания десятислойного тканого пакета с поперечной прошивкой

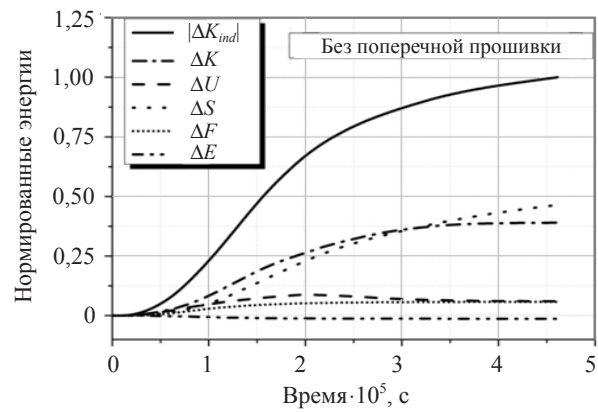


Рис. 8. Нормированные величины энергий при пробивании десятислойных образцов без поперечной прошивки

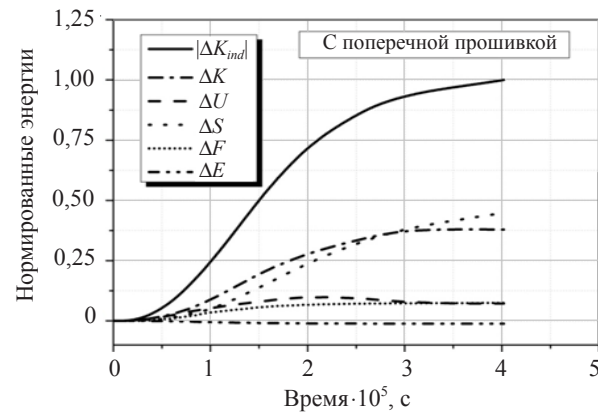


Рис. 9. Нормированные величины энергий при пробивании десятислойных образцов с поперечной прошивкой

По результатам натуральных и виртуальных баллистических тестов у 3D-образцов не было выявлено улучшения диссипативных свойств по сравнению с обычными 2D-преградами. Как видно из графиков различных составляющих энергии в системе ударник–тканый пакет, приведенных на рис. 8 и 9, механизмы диссипации энергии также оказываются сходными для прошитых и непрошитых 10 слоев полотна. При этом поглощение энергии ударника за счет увеличения кинетической энергии волокон ΔK и в этом случае играет не меньшую роль, чем суммарные потери на трение ΔS , и оказывается примерно в три раза выше рассеяния энергии за счет разрушения ΔF и увеличения упругой энергии волокон ΔU .

Список литературы

1. Mossakovsky P.A., Antonov F.K., Kolotnikov M.E., Kostyreva L.A., Bragov A.M., Balandin V.V. Experimental investigation and FE analysis of fiber woven layered composites under dynamic loading. *Proceedings of the 12th International LS-Dyna Users Conference*. 2012. www.lsdynaconferences.com/12th_LS-DYNA_Conference_2012_Agenda.pdf
2. Моссаковский П.А., Антонов Ф.К., Костырева Л.А., Брагов А.М., Баландин В.В. Экспериментальное исследование и конечно-элементный анализ тканых композитов в условиях ударного нагружения. *Проблемы прочности и пластичности*. 2014. Вып. 76. Ч. 1. С. 39–45.
3. Duan Y., Keefe M., Bogetti T.A., Cheeseman B.A. Modeling the role of friction during ballistic impact of high-strength plain-weave fabric. *Composite Structures*. 2005. No 68. P. 331–337.
4. Duan Y., Keefe M., Bogetti T.A., Powers B. Finite element modeling of transverse impact on a ballistic fabric. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2006. No 48(1). P. 33–43.
5. Kirkwood K.M., Kirkwood J.E., Lee Y.S., Egres R.G., Wagner N.J., Wetzel E.D. Yarn pull-out as a mechanism for dissipating ballistic impact energy in kevlar KM-2 fabric. Part I: Quasi-static characterization of yarn pull-out. *Textile Research Journal*. 2004. No 74. P. 920–928.
6. Kirkwood K.M., Kirkwood J.E., Lee Y.S., Egres R.G., Wagner N.J., Wetzel E.D. Yarn pull-out as a mechanism for dissipating ballistic impact energy in kevlar KM-2 fabric. Part II: Predicting ballistic performance. *Textile Research Journal*. 2004. No 74. P. 939–948.
7. Stig F., Hallström S. Influence of crimp on 3D-woven fibre reinforced composites. *Composite structures*. 2013. No 95. P. 114–122.

References

1. Mossakovsky P.A., Antonov F.K., Kolotnikov M.E., Kostyreva L.A., Bragov A.M., Balandin V.V. Experimental investigation and FE analysis of fiber woven layered composites under dynamic loading. *Proceedings of the 12th International LS-Dyna Users Conference*. 2012. www.lsdynaconferences.com/12th_LS-DYNA_Conference_2012_Agenda.pdf
2. Mossakovskiy P.A., Antonov F.K., Kostyreva L.A., Bragov A.M., Balandin V.V. Eksperimental'noe issledovanie i konechno-elementnyy analiz tkanykh kompozitov v usloviyakh udarnogo nagruzheniya. *Problemy prochnosti i plastichnosti*. 2014. Vyp. 76. Ch. 1. S. 39–45.
3. Duan Y., Keefe M., Bogetti T.A., Cheeseman B.A. Modeling the role of friction during ballistic impact of high-strength plain-weave fabric. *Composite Structures*. 2005. No 68. P. 331–337.
4. Duan Y., Keefe M., Bogetti T.A., Powers B. Finite element modeling of transverse impact on a ballistic fabric. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2006. No 48(1). P. 33–43.
5. Kirkwood K.M., Kirkwood J.E., Lee Y.S., Egres R.G., Wagner N.J., Wetzel E.D. Yarn pull-out as a mechanism for dissipating ballistic impact energy in kevlar KM-2 fabric. Part I: Quasi-static characterization of yarn pull-out. *Textile Research Journal*. 2004. No 74. P. 920–928.
6. Kirkwood K.M., Kirkwood J.E., Lee Y.S., Egres R.G., Wagner N.J., Wetzel E.D. Yarn pull-out as a mechanism for dissipating ballistic impact energy in kevlar KM-2 fabric. Part II: Predicting ballistic performance. *Textile Research Journal*. 2004. No 74. P. 939–948.
7. Stig F., Hallström S. Influence of crimp on 3D-woven fibre reinforced composites. *Composite structures*. 2013. No 95. P. 114–122.

INVESTIGATION OF DISSIPATIVE FACTORS IN PUNCTURING MULTILAYERED WOVEN OBSTACLES

**Mossakovsky P.A.¹, Balandin V.V.², Belyayev A.P.¹, Belyakova T.A.^{1,3},
Bragov A.M.², Inyukhin A.V.¹, Kostyreva L.A.¹**

¹*Institute of Mechanics, Lomonosov Moscow State University,
Moscow, Russian Federation*

²*Research Institute of Mechanics University of Nizhni Novgorod
Nizhni Novgorod, Russian Federation*

³*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation*

Experimental-computational investigation of dissipative factors in the process of impacting and penetrating of barriers made of woven aramid fiber composites is presented. Various types of 2D woven layers (13 types) are considered, as well as some characteristic types of transversal sewing as modifications of 3D weaving. It is found out that the main dissipative factor in penetrating woven barriers of relatively small thickness (up to 10 layers) is increasing of the kinetic energy of fibers, not the traditionally considered losses on friction and failure. In corroboration of this result, it is shown that transversal sewing of a multilayered woven composite used for increasing its bending stiffness, but, in doing so, limiting the displacement of fibers, does not contribute to increasing the protective properties of the barriers.

Keywords: puncture, failure, multilayered obstacles, energy dissipation, aramid fibers, woven composites, types of weaving, transversal sewing.